第47卷 第4期
2024年4月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 4
Apr. 2024

西藏定结地区不同类型沙丘表层沉积物粒度特征及其环境意义

龚逸夫， 潘美慧， 李 娜， 郝泽文， 陈有桂， 李晨露

（西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：为了探讨粒度特征所指示的环境意义，对西藏定结地区现代沙丘进行采样，分析不同类型沙丘表层沉积物的粒度特征。结果表明：(1) 流动沙丘和爬坡沙丘粒度组成相似，灌丛沙堆与二者粒度组成差异较大。流动沙丘和爬坡沙丘表层沉积物主要以细砂和中砂为主，而灌丛沙堆表层沉积物以极细砂、细砂和粉砂为主。(2) 不同类型沙丘粒度参数呈现不同变化趋势，流动沙丘和爬坡沙丘表层沉积物分选较好，近对称，中等尖锐，灌丛沙堆表层沉积物分选中等，正偏，很尖锐。(3)流动沙丘和爬坡沙丘频率分布曲线呈近似对称的单峰分布，灌丛沙堆频率分布曲线呈双峰分布；不同类型沙丘表层沉积物概率累积曲线差异较为明显。(4) 不同类型沙丘表层沉积物沉积环境主要以风成沉积为主，少数为河流沉积。(5) 不同类型沙丘表层沉积物粒度特征对比可知，粒度特征的差异主要是沙源、植被覆盖度和风况共同作用的结果。

关 键 词：沙丘；表层沉积物；粒度特征；环境意义；定结地区

文章编号：1000－6060(2024)04－0588－11(0588～0598)

风成沉积是地球沉积系统中重要的组成部分，也是全球气候变化、环境变化和人类活动等诸多因素综合作用的结果。风成沉积不仅广泛分布于干旱和半干旱的沙漠地区，也分布于沿海地区和高原地区，该过程对当地气候、生态环境和人类生活有着重大影响[1-4]。粒度特征被广泛运用于风沙地貌研究中，不同沉积环境、物源及风况等因素导致不同的沉积物粒度特征差异较为明显[5]，是分析风沙沉积物的物质来源、搬运动力机制及沉积环境的关键[6-7]。研究沙丘沉积物的粒度及其参数特征，有助于沙丘沉积环境的反演和解释[8-13]。早期国外学者对于风成沉积物粒度特征的研究，主要用于反映气候变化情况、搬运动力状况以及沉积环境变化[14-15]。国内关于风成沉积物的研究主要集中在北方地区和青藏高原地区。在北方地区的研究中，以往学者通常以沙漠地区为对象展开研究，例如科尔沁沙地[16]、浑善达克沙地[17-18]、库姆塔格沙漠[19-20]、腾格里沙漠[21-23]等，通过分析其粒度特征，从而揭示其环境意义。在青藏高原地区，研究主要集中在青藏高原东北部及中部地区，更多学者通过对区域不同类型沙丘粒度特征分析，阐明沙丘的形成过程，并揭示地区沙丘沉积物的物源及风沙活动过程[24-26]；也有学者通过对铁路沿线沉积物粒度特征展开研究，分析危害铁路沿线的沙物质来源，以期为铁路沿线风沙运动及科学防治提供有益参考[27]。

青藏高原作为一个独特的巨型地貌单元，其演化过程对全球环境变化产生非常重要的影响。青藏高原从地质历史时期到现在，风沙活动一直处于十分活跃的状态，致使该地区风成沉积物广泛分布，沙尘天气频发，土地沙漠化处于正在发展的态势，生态环境脆弱[28]。西藏定结地区风沙地貌广泛分布，沙丘类型多样。近年来，团队以西藏定结为研究区开展了大量的研究，在古风沙活动研究方面，通过进行粒度、磁化率、碳酸钙含量、有机质含

收稿日期：2023-07-20； **修订日期**：2023-09-03
基金项目：国家自然科学基金项目(4180071858)资助
作者简介：龚逸夫(1997-)，男，硕士研究生，主要从事环境变化及沙漠化防治等方面的研究. E-mail: 2021222909@nwnu.edu.cn
通讯作者：潘美慧(1983-)，女，副教授，主要从事环境变化及沙漠化防治等方面的研究. E-mail: panmh@nwnu.edu.cn

量和色度等分析试验，根据试验结果综合对比，重建定结地区全新世风沙活动过程[7]；在风沙地貌格局演变方面，对定结地区风沙地貌特征及近20 a来风沙地貌格局动态变化进行定量研究[29]；在元素地球化学特征方面，对不同类型沙丘样品的主量、微量元素分析，并探讨其环境意义[30-31]；在粒度特征方面，对流动沙丘和爬坡沙丘按不同地貌部位进行采样，分析其粒度特征，发现不同地貌部位的粒度特征存在显著差异[32-33]。针对定结地区粒度特征的研究，以往学者仅对一种沙丘从不同地貌部位分析描述，而本文以多种类型沙丘为研究对象，分析不同类型沙丘的粒度特征，并对不同类型沙丘粒度特征进行综合性的对比，得出不同类型沙丘粒度特征差异，进一步揭示该地区的风沙沉积特征。本文系统采集了定结地区3种不同类型沙丘表层沉积物（流动沙丘、灌丛沙堆和爬坡沙丘），以及区域内潜在沙源（古风成砂、河漫滩和湖滩）的表层沉积物，分析其粒度特征，以期进一步明确青藏高原风沙沉积特征，并为区域沙漠化防治提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区地处于青藏高原南部（图1a），属于西藏自治区日喀则地区，行政区划包括萨迦县、定结县和定日县，呈现出南北高、中部低的地貌特征（图1c）[34]。该区域为高原温带半干旱季风气候，春冬季干旱多风，夏季温暖湿润，日照非常充足，蒸发剧烈[35]。年平均气温约2 ℃，年降水量为240 mm，雨季为7—8月，蒸发量约为降水量的10倍多，年大风天数多达230 d，拥有充足的风力资源，风力作用是造成该区域风沙灾害严重的重要原因之一[7-8]。定

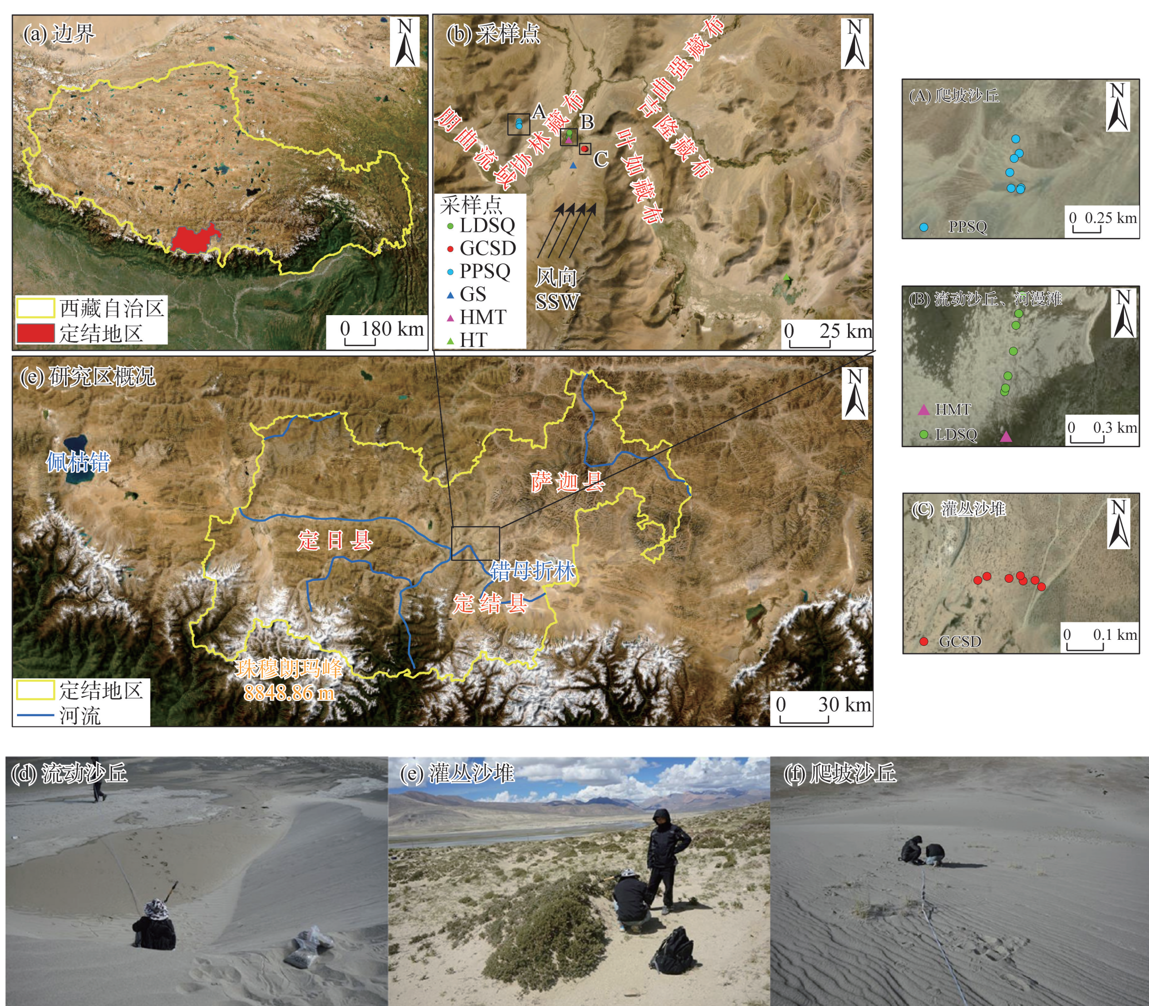


图1　研究区概况及采样位置

Fig. 1　Overview of the study area and sampling locations

结地区现代风沙分布范围广泛,沙丘地貌十分典型,形态复杂多样,大多分布在河谷地区以及部分山坡上[6]。

1.2 样品采集与研究方法

2012、2020年2次前往西藏定结地区采集样品,本文选取定结地区23个不同类型的现代沙丘,采集沙丘表层沉积物(图1A~C)。其中流动沙丘7个(LDSQ1~LDSQ7)、灌丛沙堆8个(GCSD1~GCSD8)、爬坡沙丘7个(PPSQ1~PPSQ7),采集河漫滩表层沉积物1个(HMT)、古风成砂沉积剖面1个(GS)、湖滩表层沉积物1个(HT),共计186个样品。流动沙丘与爬坡沙丘从迎风坡坡底向坡顶以5 m或10 m等间距采样(根据沙丘大小),背风坡取上、中、下3个样品;灌丛沙堆分别在迎风坡底部、背风坡中部与背风坡底部采样,所有样品均取表层以下5 cm样品;河漫滩样品由河至沙丘方向表层去除2 cm采集;古风成砂沉积剖面位于协林藏布北岸的三级河流阶地上,先对剖面表层5 cm进行去除,再以5 cm等间距进行采样;湖滩样品在湿地和山坡之间间隔10 m采集。

沙丘样品的粒度前处理和测量工作在西北师范大学土壤地理学实验室完成。实验采用Mastersizer 3000激光粒度仪进行粒度测试,测试结果按照《风沙地貌学》[5]中的粒级标准进行划分,即黏土(<0.004 mm)、粉砂(0.004~0.063 mm)、极细砂(0.063~0.125 mm)、细砂(0.125~0.250 mm)、中砂(0.250~0.500 mm)、粗砂(>0.500 mm)。粒度参数采用Folk等[36]计算平均粒径、标准偏差、偏度与峰度等粒度参数。

2 结果与分析

2.1 粒级组成特征

定结地区沙丘表层沉积物粒径分布范围较宽,从粗砂到黏土各个组分均有分布,主要以细砂、中砂和极细砂为主,其余组分相对较少。

流动沙丘表层沉积物主要以细砂(47.45%)和中砂(36.35%)为主,其次为极细砂(10.72%)和粗砂(3.70%),黏土与粉砂含量最低,共仅占总含量的1.78%(图2a)。灌丛沙堆表层沉积物主要以极细砂(51.00%)、细砂(26.83%)和粉砂(17.64%)为主,其次为中砂(2.48%)和黏土(1.12%),粗砂含量最低(<1%)(图2b)。爬坡沙丘表层沉积物以细砂(48.95%)和中砂(38.63%)为主,其次为极细砂(8.75%)和粗砂(3.40%),粉砂含量占比较少,不含黏土组分(图2c)。

不同类型沙丘表层沉积物和潜在沙源沉积物粒级组成存在明显的差异。由图2d可知,流动沙丘、爬坡沙丘和河漫滩表层沉积物以细砂为主,其次为中砂;灌丛沙堆表层沉积物和古风成砂以极细砂为主,其次为细砂;湖滩表层沉积物以细砂为主,其次为极细砂,湖滩表层沉积物粒级组成与其余类型差异较大。

2.2 粒度参数特征

流动沙丘表层沉积物平均粒径Φ1.97~2.19,平均值为Φ2.19;分选系数Φ0.60~0.71,平均值为Φ0.67,分选较好;偏度0.02~0.07,平均值为0.04;峰度0.97~1.03,平均值为0.99。灌丛沙堆表层沉积物平均粒径Φ3.17~3.49,平均值为Φ3.36;分选系数Φ0.84~1.07,平均值为Φ0.95,分选中等;偏度0.20~0.26,平均值为0.24;峰度1.61~1.85,平均值为1.74。爬坡沙丘表层沉积物平均粒径Φ1.78~2.74,平均值为Φ2.13;分选系数Φ0.45~0.75,平均值为Φ0.55,分选较好;偏度-0.01~0.12,平均值为0.03;峰度0.94~1.01,平均值为0.96。

由图3可知,不同类型沙丘沉积物的粒度参数特征差异较为明显。灌丛沙堆和古风成砂的平均粒径较大,流动沙丘和爬坡沙丘的平均粒径较小(图3a~c);流动沙丘和爬坡沙丘分选性较好,灌丛沙堆分选性中等,古风成砂、河漫滩和湖滩的分选性较差(图3a);流动沙丘和爬坡沙丘偏度为近对称,灌丛沙堆、古风成砂和湖滩偏度为正偏,河漫滩偏度为极正偏(图3b);流动沙丘和爬坡沙丘峰度集中在中等尖锐,灌丛沙堆和古风成砂集中在很尖锐(图3c)。综上所述,流动沙丘和爬坡沙丘表层沉积物粒度参数特征较为相似,灌丛沙堆表层沉积物与古风成砂粒度参数特征较为相似。

2.3 频率分布曲线与概率累积曲线

流动沙丘表层沉积物频率分布曲线均为典型单峰形态,峰值均位于Φ2附近,峰态均为近似正态峰,曲线较高、较窄,曲线斜率高(图4a);灌丛沙堆表层沉积物频率分布曲线呈现出双峰分布,主峰呈现出"高窄"形,主峰峰值位于Φ4附近,但在Φ6附近出现一个微弱次峰(图4b);爬坡沙丘表层沉积物频

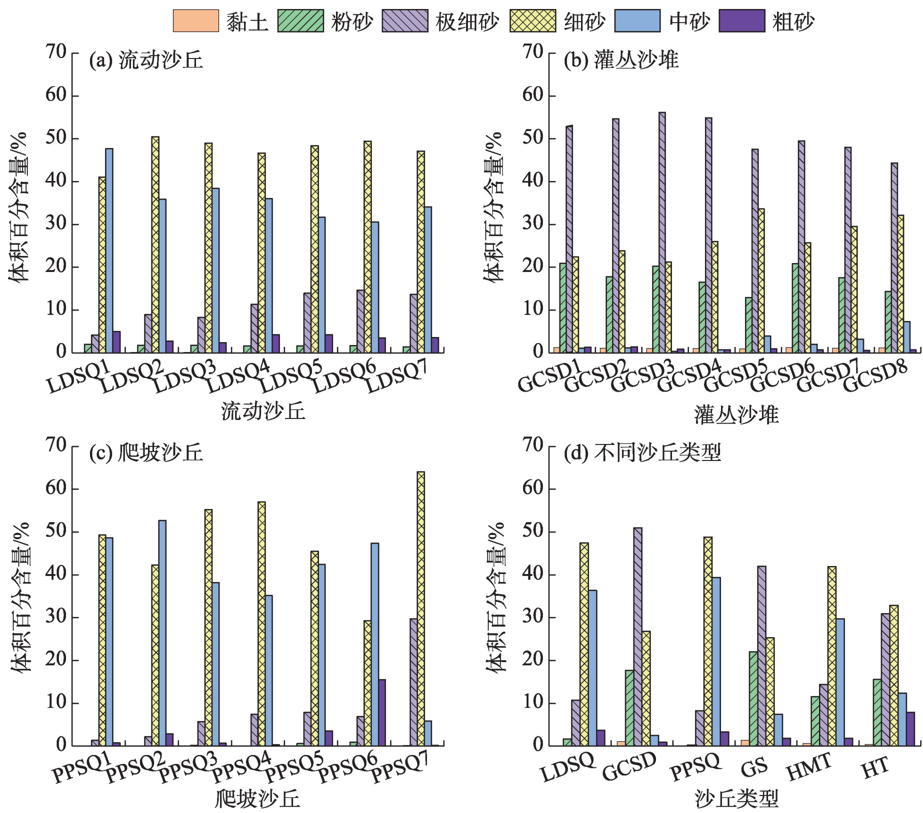
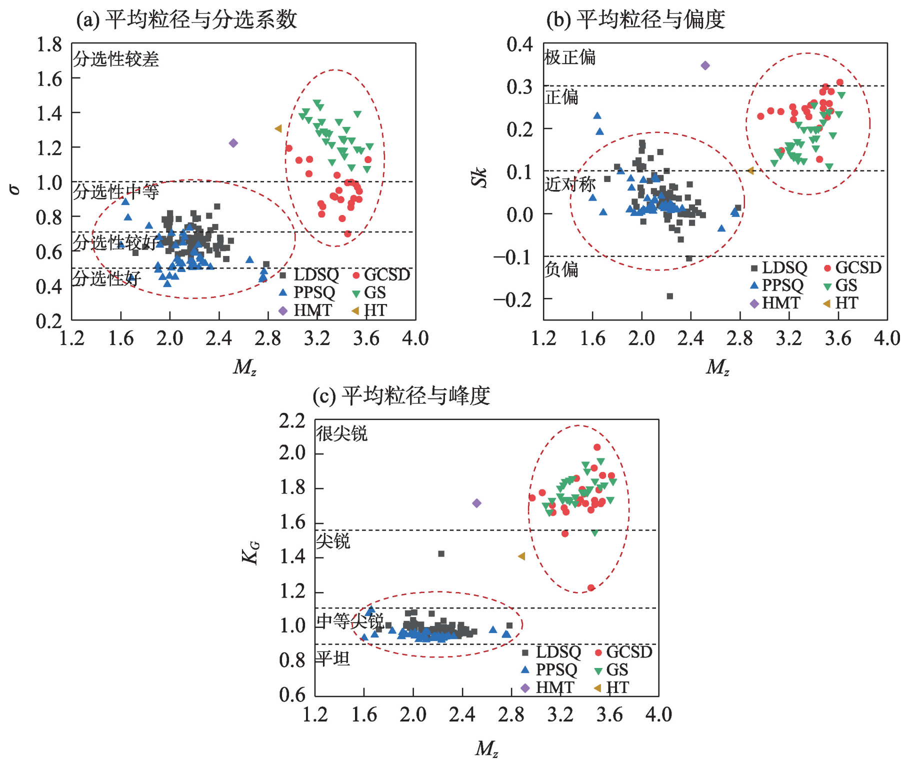


图2　不同类型沉积物粒级组成

Fig. 2　Grain composition of different types of sediments



注：M_z为平均粒径；σ为分选系数；Sk为偏度；K_G为峰度。

图3　不同类型沉积物粒度参数散点图

Fig. 3　Scatter plot of grain size parameters of different types of sediments

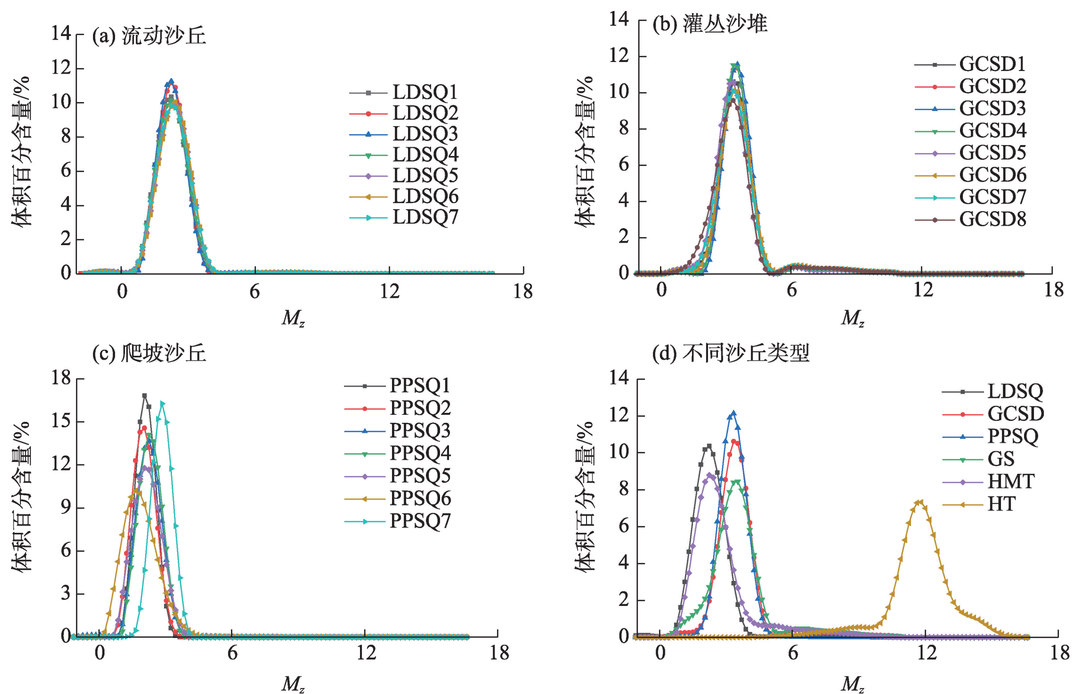


图4 不同类型沙丘频率分布曲线图

Fig. 4 Frequency distribution curves of different types of dunes

率分布曲线均为典型单峰分布,其峰态均为近似正态峰,峰值位于Φ0~4之间,曲线呈现出"高窄"形(图4c)。

综合分析3种类型沙丘表层沉积物和潜在沙源沉积物的频率分布曲线,由图4d可知,流动沙丘和河漫滩的频率分布曲线形态相似,峰值所对应的平均粒径相近;爬坡沙丘、灌丛沙堆和古风成砂的频率分布曲线形态相似,峰值所对应的平均粒径相近;湖滩的频率分布曲线与其他类型相比较为宽矮,峰值所对应的平均粒径较大。

流动沙丘表层沉积物概率累积曲线形态相似且均呈现为三段式(图5a),分别指示为跃移、蠕移和悬移3种不同的组分,以跃移为主(占95%以上),蠕移与跃移截点位于Φ1左右,悬移与跃移截点位于Φ4左右。灌丛沙堆表层沉积物概率累积曲线以三段式为主(图5b),指示为跃移、蠕移和悬移,以跃移为主,蠕移与跃移截点位于Φ1左右,悬移与跃移截点位于Φ4左右,仅有GCSD8为二段式,指示为悬移和跃移,以跃移为主,悬移与跃移截点位于Φ5左右。爬坡沙丘表层沉积物的概率累积曲线最为复杂,PPSQ1、PPSQ2、PPSQ4表层沉积物概率累积曲线为一段式,指示为跃移,PPSQ5~PPSQ7表层沉积物概率累积曲线为二段式,PPSQ5和PPSQ6指示为悬移和跃移,PPSQ7指示为蠕移和跃移,PPSQ3表层沉积物的概率累积曲线为三段式,分别指示为蠕移、跃移和悬移,蠕移与跃移截点位于Φ1左右,悬移与跃移截点位于Φ3左右,爬坡沙丘均以跃移为主(图5c)。

综合分析3种类型沙丘表层沉积物和潜在沙源沉积物的概率累积曲线,由图5d可知,湖滩表层沉积物概率累积曲线与其他类型差异较大,其他类型均以跃移为主,流动沙丘和爬坡沙丘曲线形态相似,跃移占比相近,灌丛沙堆、古风成砂和河漫滩曲线形态相似,跃移占比相近。

3 讨 论

3.1 不同类型沙丘表层沉积物粒度特征反映的沉积环境

本文采用Sahu经验判别模型[37]来对不同类型沙丘表层沉积物进行沉积环境判别。将4个粒度参数分别代入Sahu经验判别模型[37]中进行计算,对其沉积环境进行分析,具体如下:

$$Y_1=-3.5688M_z+3.7016\sigma_1^2-2.0766Sk_1+3.1135K_G \quad (1)$$

$$Y_2=15.6534M_z+65.7091\sigma_1^2+18.1071Sk_1+18.5043K_G \quad (2)$$

$$Y_3=0.2852M_z-8.7604\sigma_1^2-4.8932Sk_1+0.0482K_G \quad (3)$$

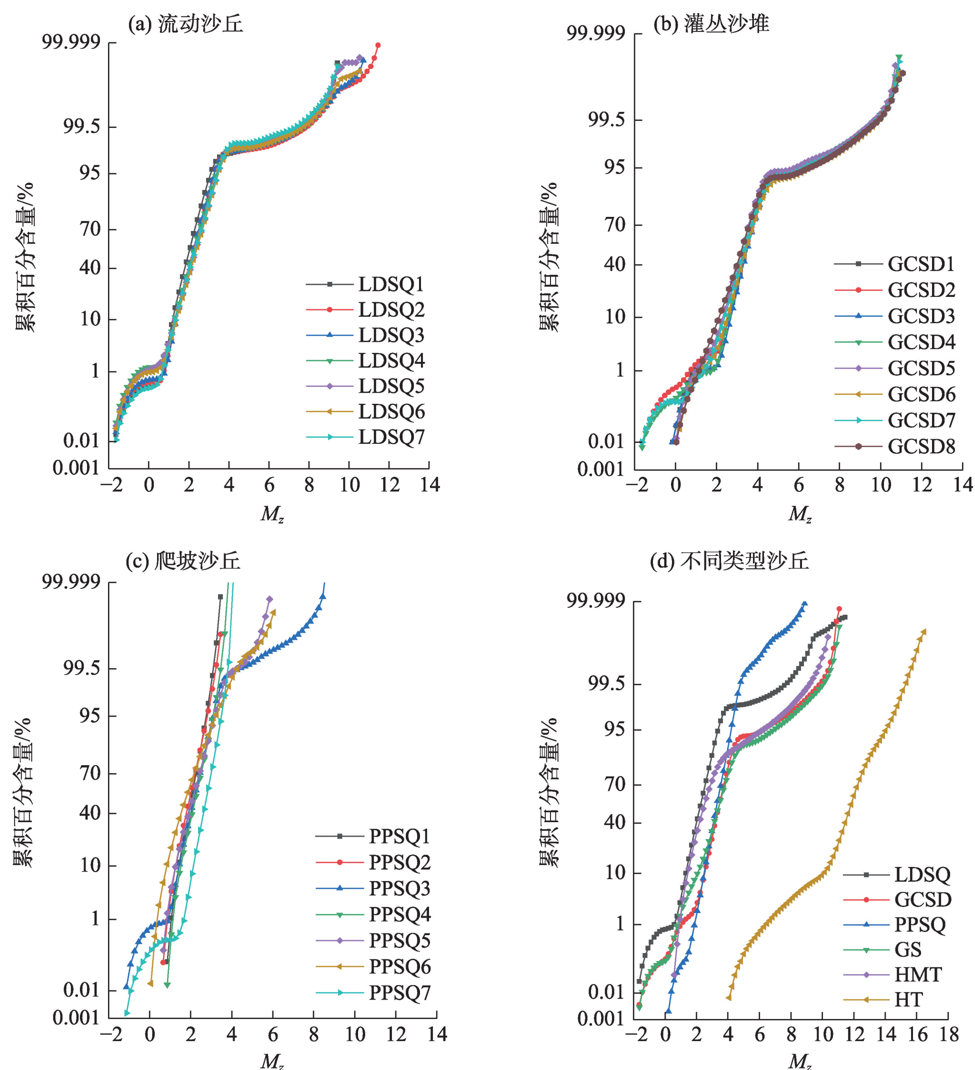


图5 不同类型沙丘概率累积曲线图

Fig. 5 Probability accumulation curves of different types of dunes

$$Y_4=0.7215M_z-0.4030\sigma_1^2+6.7322Sk_1+5.2927K_G \quad (4)$$

式中：Y_1、Y_2、Y_3、Y_4分别为风成与海滩判别、海滩与浅海判别、浅海与河流判别、河流与浊流判别；M_z为平均粒径；σ_1为分选系数；Sk_1为偏度；K_G为峰度。

$Y_1<-2.7411$，则判定为风成沉积，$Y_1>-2.7411$，则判定为海滩沉积；$Y_2<65.3650$，则判定为海滩沉积，$Y_2>65.3650$，则判定为浅海沉积；$Y_3<-7.4190$，则判定为河流沉积，$Y_3>-7.4190$，则判定为浅海沉积；$Y_4<9.8433$，则判定为浊流沉积，$Y_4>9.8433$，则判定为河流沉积。沉积环境判定结果表明：LDSQ1和PPSQ6为浅海沉积、GCSD8为河流沉积，其余沙丘均属于风成沉积。总体来看，定结地区沙丘表层沉积物沉积环境主要以风成沉积为主。

根据表1可知，定结地区沙丘表层沉积物主要以风成沉积物为主，靠近河流的LDSQ1、PPSQ6和GCSD8沉积环境较为复杂，这可能受水动力和风动力交互作用的影响，风动力作用小，水动力作用显著。LDSQ1和PPSQ6通过Sahu经验判别模型[37]得出结果为浅海沉积，但根据以往学者研究认为定结地区第四纪以来不具备海相沉积条件，而是区域内湖泊发育广泛，存在大型堰塞湖[38-39]，因此采用兰迪姆判别公式（冰碛物与冲积扇）[40]和李昌志判别模型[41]对LDSQ1和PPSQ6予以判别，判定LDSQ1与PPSQ6为河流沉积。

3.2 不同类型沙丘表层沉积物粒度特征差异的成因分析

沙源是导致沙丘粒度特征差异的影响因素，流动沙丘、爬坡沙丘和河漫滩表层沉积物的粒度特征

表1 沉积环境判别结果

Tab. 1 Discriminant result of sedimentary environment

沙丘名称	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	沉积环境
LDSQ1	−2.5891	76.6935	−3.1957	−	浅海沉积
LDSQ2	−3.5028	−	−	−	风成沉积
LDSQ3	−3.0650	−	−	−	风成沉积
LDSQ4	−2.9754	−	−	−	风成沉积
LDSQ5	−3.1248	−	−	−	风成沉积
LDSQ6	−3.4647	−	−	−	风成沉积
LDSQ7	−3.1699	−	−	−	风成沉积
GCSD1	−4.1069	−	−	−	风成沉积
GCSD2	−3.9026	−	−	−	风成沉积
GCSD3	−5.2942	−	−	−	风成沉积
GCSD4	−4.6130	−	−	−	风成沉积
GCSD5	−3.5971	−	−	−	风成沉积
GCSD6	−3.3971	−	−	−	风成沉积
GCSD7	−3.3136	−	−	−	风成沉积
GCSD8	−1.8223	164.1091	−10.3273	13.3543	河流沉积
PPSQ1	−3.4693	−	−	−	风成沉积
PPSQ2	−3.0643	−	−	−	风成沉积
PPSQ3	−3.7797	−	−	−	风成沉积
PPSQ4	−3.9422	−	−	−	风成沉积
PPSQ5	−3.0637	−	−	−	风成沉积
PPSQ6	−1.3442	86.0385	−5.0187	−	浅海沉积
PPSQ7	−5.9511	−	−	−	风成沉积

注：Y_1、Y_2、Y_3、Y_4分别为风成与海滩判别、海滩与浅海判别、浅海与河流判别、河流与浊流判别。

较为相似，灌丛沙堆表层沉积物和古风成砂的粒度特征较为相似，湖滩表层沉积物粒度特征与其余类型差异较大。结合团队以往研究结果，对不同类型沙丘表层沉积物地球化学特征分析，选择比值稳定和含量稳定的元素，通过示踪元素和元素比值的主成分分析和多维尺度分析，推测出流动沙丘和爬坡沙丘物质来源为附近的河漫滩沉积物，灌丛沙堆物质来源主要是古风成砂，附近河漫滩沉积物也为其提供沙源[30−31]。本文通过不同类型沙丘沉积物粒度特征对比所反映出的物源结果与地球化学特征分析出的结果相符，佐证粒度特征所反映结果的有效性。本研究与雅鲁藏布江山南宽谷段爬坡沙丘、雅鲁藏布江米林宽谷爬坡沙丘以及美国加利福尼亚莫哈韦沙漠中爬坡沙丘所分析出的物质来源较为相似，均以河漫滩沉积物所提供，沉积物在受风力作用下不断前移堆积扩展，但粒度特征之间存在显著差异，与区域风力环境、沙丘与物源区的距离等因素有关[33,42−43]。

植被覆盖度影响沙丘表层沉积物粒度特征的重要因素之一，也是分析不同类型沙丘粒度特征差异的关键指标，植被覆盖度高，地表风沙活动不明显，植被覆盖度低，则地表风沙活动强烈。定结地区植被覆盖度介于0.10~0.25之间，且流动沙丘介于0.10~0.14之间，灌丛沙堆介于0.20~0.25之间、爬坡沙丘介于0.11~0.20之间(图6)，流动沙丘和爬坡沙丘地表植被覆盖状况接近，灌丛沙堆地表植被覆盖状况最好。植被覆盖度对灌丛沙堆表层沉积物粒度特征的影响较大，由于其植被覆盖度较高，细颗粒物沉降，导致粒径明显细于流动沙丘和爬坡沙丘，呈现出灌丛沙堆表层沉积物整体粒径较细，以极细砂为优势粒级。

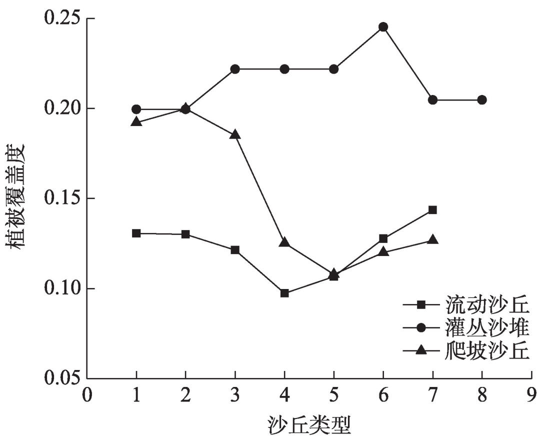


图6 不同类型沙丘表层沉积物植被覆盖度

Fig. 6 FVC of surface sediments of different types of dunes

定结地区冬季寒冷干燥，风力强劲，风向主要以SSW为主(图1b)，且风向与河谷走向几乎处于平行状态，该状态致使风力更加强劲[44]，因此沙丘表层沉积物粒度特征受风动力影响较明显。流动沙丘和爬坡沙丘沿风向平均粒径逐渐变粗，分选能力逐渐增强，由于山坡顶部风的剪切力弱，当砂粒被风搬运至坡顶时，较粗砂粒在受重力作用影响下在山坡顶部沉积，而较细砂粒在风力作用下翻过顶部，在背风坡沉积，从而山坡顶部平均粒径较粗，两侧平均粒径较细；灌丛沙堆沿着风向平均粒径大体上呈现逐渐变细的变化趋势，分选性变好，坡底靠近河流，河流提供了许多沙物质，分选性较差，且又受到植被的影响，较粗颗粒难以搬运，因此随着高度的增加，平均粒径逐渐变细。风况导致3种不同类型沙丘呈现出差异，流动沙丘和爬坡沙丘差异较

小,灌丛沙丘差异较大,靠近河流风况影响较小,远离河流风况影响较大,且海拔越高风速越大,沙丘表层沉积物粒度特征受风况影响越明显。毛东雷等[45]认为这是由于不同类型沙丘形成的风动力条件不同,在风动力条件下对砂物质搬运产生影响,在地形、植被等综合作用下,导致区域不同类型沙丘在粒度特征上存在差异。

4 结 论

(1) 流动沙丘表层沉积物主要以细砂和中砂为主,其次为极细砂和粗砂,分选性较好,近对称,中等尖锐,频率分布曲线为典型单峰态,概率累积曲线为三段式分布,跃移组分为主;灌丛沙堆表层沉积物主要以极细砂、细砂和粉砂为主,其次为中砂和黏土,分选性中等,正偏,很尖锐,频率分布曲线呈双峰态分布,概率累积曲线为二、三段式分布,跃移组分为主;爬坡沙丘表层沉积物主要以细砂和中砂为主,其次为极细砂和粗砂,分选较好,近对称,中等尖锐,频率分布曲线为典型单峰态,概率累积曲线为一、二、三段式均有分布,跃移组分为主。

(2) 根据研究区各粒度参数,结合Sahu经验判别模型、兰迪姆判别公式、李昌志判别模型计算得出,LDSQ1、GCSD8和PPSQ6为河流沉积,其余沙丘均为风成沉积。

(3) 不同类型沙丘表层沉积物粒度特征差异主要受沙源、植被覆盖度和风况的影响。根据粒度特征结合已有研究,流动沙丘、爬坡沙丘的物源可能为河漫滩沉积,灌丛沙堆物源为古风成砂和河漫滩沉积;流动沙丘和爬坡沙丘植被覆盖度低,植被对其粒度特征影响较小,灌丛沙堆植被覆盖度较高,细颗粒物沉降,导致细颗粒组分增加;在水平方向上,随着主导风向上,沙丘分选性逐渐变好,在垂直方向上,随海拔升高,流动沙丘和爬坡沙丘粒径变粗,灌丛沙堆粒径变细,分选性均为变好。

参考文献(References)

[1] Ding J, Wu Y, Tan L, et al. Trace and rare earth element evidence for the provenances of aeolian sands in the Mu Us Desert, NW China[J]. Aeolian Research, 2021, 50: 100683, doi: 10.1016/j.aeolia.2021.100683.

[2] Zhang Z, Liang A, Zhang C, et al. Gobi deposits play a significant role as sand sources for dunes in the Badain Jaran Desert, northwest China[J]. Catena, 2021, 206: 105530, doi: 10.1016/j.catena.2021.105530.

[3] Carlos A, Roberto M, David R, et al. Estimation of sediment grain sizes in a mesotidal area, Dithmarschen Bight, German North Sea [J]. Marine Geology, 2019, 417(1): 9-11.

[4] 王琳栋, 杨太保, 梁烨, 等. 会宁地区全新世黄土沉积粒度特征及其古气候意义[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1150-1156. [Wang Lindong, Yang Taibao, Liang Ye, et al. Grain size characteristics in the loess-paleosol at Huining Section and its signification to paleoclimate during Holocene[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(6): 1150-1156.]

[5] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 1987. [Wu Zheng. Aeolian geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 1987.]

[6] 潘美慧. 西藏定结地区全新世风沙活动研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2012. [Pan Meihui. Study on Holocene aeolian sand activity in Dinggye area of Tibet[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2012.]

[7] 薛雯轩. 藏南河谷全新世典型时期古风成砂粒度特征研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020. [Xue Wenxuan. Grain size characteristics of palaeo-aeolian sand in the south Tibetan river valley during Holocene typical periods[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020.]

[8] Zhang C L, Shen Y P, Li Q, et al. Sediment grain-size characteristics and relevant correlations to the aeolian environment in China's eastern desert region[J]. Science of the Total Environment, 2018, 627(1): 586-599.

[9] 沈亚萍, 张春来, 李庆, 等. 中国东部沙区表层沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 150-157. [Shen Yaping, Zhang Chunlai, Li Qing, et al. Grain-size characteristics of surface sediments in the eastern desert regions of China[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(1): 150-157.]

[10] Shen Y P, Zhang C L, Wang R, et al. Spatial heterogeneity of surface sediment grain size and aeolian activity in the Gobi desert region of northwest China[J]. Catena, 2020, 188(2): 104-120.

[11] 何强强, 毛东雷, 朱文煜, 等. 新疆策勒绿洲-沙漠过渡带不同植被下的沙丘形态特征及沉积物粒度分析[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 70-81. [He Qiangqiang, Mao Donglei, Zhu Wenyi, et al. Morphological characteristics and sediment particle size analysis of sand dunes with different vegetations in the Cele oasis-desert ecotone, Xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 70-81.]

[12] 何强强, 毛东雷, 徐佳瑞, 等. 策勒绿洲-沙漠过渡带不同沙丘的沉积物粒度特征及沉积环境[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 135-145. [He Qiangqiang, Mao Donglei, Xu Jiarui, et al. Sediment granularity characteristics and deposition environment of different dunes in the Cele oasis-desert ecotone[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 135-145.]

[13] 王佩, 马倩, 朱元璞, 等. 新疆图开沙漠灌丛沙堆和抛物线形沙丘表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1644-1653. [Wang Pei, Ma Qian, Zhu Yuanxi, et al. Grain

size characteristics and sedimentary environment of surface sediments from nebkhas and parabolic dunes in the Tukai Desert, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1644−1653.]

[14] Pettke T, Halliday A N, Hall C M, et al. Dust production and deposition in Asia and the north Pacific Ocean over the past 12 Myr[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 178(3−4): 397−413.

[15] Seo I, Lee Y I, Yoo C M, et al. Sr-Nd isotope composition and clay mineral assemblages in eolian dust from the central Philippine Sea over the last 600 kyr: Implications for the transport mechanism of Asian dust[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, doi: 10.1002/2014jd022025.

[16] 张桂华, 刘洪妍, 介冬梅, 等. 科尔沁沙地不同类型沙丘表土有机质与粒度特征差异分析[J]. 生态环境学报, 2020, 29(11): 2223−2230. [Zhang Guihua, Liu Hongyan, Jie Dongmei, et al. Analyzing differences of topsoil organic matter and grain size of different types of dunes in Horqin[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(11): 2223−2230.]

[17] 乌日查呼, 春喜, 张卫青, 等. 浑善达克沙地沙粒特征及其沉积环境[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(1): 69−76. [Wuri Chahu, Chun Xi, Zhang Weiqing, et al. Grain size analysis and the sedimentary environment in Otindag Sandy Land[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(1): 69−76.]

[18] 张娅璐, 春喜, 周海军, 等. 沙漠沙地风沙与湖相沉积物粒度判别方法及环境指示意义[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 1−9. [Zhang Yalu, Chun Xi, Zhou Haijun, et al. Grain size discriminant method for aeolian and lacustrine sediments of deserts and its environmental indication[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 1−9.]

[19] 苏志珠, 梁爱民, 马义娟, 等. 库姆塔格沙漠典型线形沙丘粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 877−884. [Su Zhizhu, Liang Aimin, Ma Yijuan, et al. Grain-size characteristics of typical linear dunes in the Kumtagh Desert[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(4): 877−884.]

[20] 何清, 杨兴华, 霍文, 等. 库姆塔格沙漠粒度分布特征及环境意义[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 18−22. [He Qing, Yang Xinghua, Huo Wen, et al. Characteristics of sand granularity from Kumtag Desert and environment significance[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(1): 18−22.]

[21] 吴雪琴, 解云虎, 刘晓茜, 等. 腾格里沙漠东南缘4种典型沙生灌木林下的沉积物粒度特征[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(3): 19−27. [Wu Xueqin, Xie Yunhu, Liu Xiaoxi, et al. Grain size characteristics of sediment under four typical sand shrubs in the southeast edge of Tengger Desert[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(3): 19−27.]

[22] 古拉依赛木·艾拜都拉, 张峰, 吴枫, 等. 腾格里沙漠沙丘沉积物粒度特征及其空间差异[J]. 中国沙漠, 2022, 42(5): 133−145. [Aibaidoula Gulayisaimu, Zhang Feng, Wu Feng, et al. Grain size characteristics of dune sands and spatial variation in the Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(5): 133−145.]

[23] 李超, 董治宝, 崔徐甲. 腾格里沙漠东南缘不同发育阶段横向沙丘粒度特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 129−135. [Li Chao, Dong Zhibao, Cui Xujia. Grain-size characteristics of transverse dune during different developmental stages in the southeastern edge of the Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 129−135.]

[24] Yang S, Fang X, Yan M, et al. Grain size profiles in the Chengdu clay, eastern margin of the Tibetan Plateau: Implications for significant drying of Asia since 500 ka BP[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 38(1−2): 57−64.

[25] 黄文敏, 伍永秋, 潘美慧, 等. 西藏安多剖面沉积物粒度特征及环境意义[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2): 349−357. [Huang Wenmin, Wu Yongqiu, Pan Meihui, et al. Grain size characteristics and its environmental significance of the Amdo profile in Tibet, China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(2): 349−357.]

[26] Xu Y, Li J, Pan F, et al. Late neogene aridification and wind patterns in the Asian interior: Insight from the grain-size of aeolian deposits in Altun Shan, nortern Tibetan Plateau[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, doi: 10.1016/j.palaeo.2018.09.017.

[27] 姚正毅, 屈建军. 青藏铁路格尔木−拉萨段风成沙物源及其粒度特征[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 300−307. [Yao Zhengyi, Qu Jianjun. Source and grain size of aeolian sands along Golmud-Lhasa section of Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(2): 300−307.]

[28] 韩光中, 屈建军, 俎瑞平, 等. 西藏高原沙漠化研究中的问题和建议[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(7): 65−70. [Han Guangzhong, Qu Jianjun, Zu Ruiping, et al. Problems and suggestions in research on aeolian desertification in Tibetan Plateau[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(7): 65−70.]

[29] 马建军. 1988—2017年西藏定结地区风沙地貌格局变化及其对气候的响应[D]. 兰州: 西北师范大学, 2019. [Ma Jianjun. Changes of aeolian sand geomorphologic pattern and its response to climate in Dinggye region of Tibet during 1988—2017[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2019.]

[30] Chen Y G, Pan M H, Hao Z W, et al. Grain size-dependent geochemical evidence reveals provenance and implications of aeolian sands, Dinggye region, southern Tibet[J]. Journal of Mountain Science, 2022: 1998−2014.

[31] Pan M H, Chen Y G, Hao Z W, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of surface sediments from different types of sand dunes in the Dinggye Area, Southern Tibet[J]. Int J Environ Res Public Health, 2022, 19, 10628, doi:10.3390/ijerph191710628.

[32] 潘美慧, 薛雯轩, 伍永秋, 等. 西藏定结地区爬坡沙丘粒度特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1337−1345. [Pan Meihui, Xue Wen Xuan, Wu Yongqiu, et al. Grain size characteristics of the climbing dunes in Dinggye area of Tibet[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1337−1345.]

[33] 潘美慧, 郝泽文, 齐宇涵, 等. 西藏朋曲流域不同地貌部位流动

沙丘粒度特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6): 138−147. [Pan Meihui, Hao Zewen, Qi Yuhan, et al. Grain size characteristics of moving dune in different geomorphological locations in Pengqu Basin, Tibet, China[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(6): 138−147.]

[34] 侯丽燕, 单新建, 龚文瑜, 等. 基于多期DInSAR数据的2016年定结地震序列发震断层特征研究[J]. 地球物理学报, 2020, 63(4): 1357−1369. [Hou Liyan, Shan Xinjian, Gong Wenyu, et al. Characterizing seismogenic fault of 2016 Dingjie earthquake based on multitemporal DInSAR[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(4): 1357−1369.]

[35] 叶延琼, 杨忠, 第宝锋, 等. 西藏定结县草地资源与畜牧业可持续发展[J]. 山地学报, 2003, 21(3): 337−341. [Ye Yanqiong, Yang Zhong, Di Baofeng, et al. On grassland resource and the sustainable development of animal husbandry in Dingjie County, Tibet[J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(3): 337−341.]

[36] Folk R L, Ward W C. Brazos River Bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3−26.

[37] Sahu B K. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments[J]. Journal of Sedimentary Research, 1964, 34(1): 73−78.

[38] Hu H P, Feng J L, Chen F. Sedimentary records of a palaeo-lake in the middle Yarlung Tsangpo: Implications for terrace genesis and outburst flooding[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 192: 135−148.

[39] 安庆, 安萍, 徐汝汝, 等. 青藏高原不同地区沉积物的粒度特征与沉积环境判别公式适用性对比研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2017, 30(4): 37−47. [An Qing, An Ping, Xu Ruru, et al. Comparative study on grain size characteristics of sediments in different regions of the Tibetan Plateau and the applicability of sedimentary environment discriminant formulas[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2017, 30(4): 37−47.]

[40] Landim P M, Frakes L A. Distinction between tills and other diamictons based on textural characteristics[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1968, 38(4): 1213−1223.

[41] 李昌志, 王裕宜. 泥石流, 冰碛和河湖沉积物的粒度特征及判别[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 50−54. [Li Changzhi, Wang Yuyi. Prelimilary exploration on grain characteristic and discrimination of debris flow deposit, moraine and river & lake deposit[J]. Journal of Mountain Science, 1999, 17(1): 50−54.]

[42] 董苗, 严平, 王晓旭, 等. 雅鲁藏布江山南宽谷段爬坡沙丘表层沉积物特征[J]. 中国沙漠, 2022, 42(2): 153−163. [Dong Miao, Yan Ping, Wang Xiaoxu, et al. Characteristics of surface sediments on the climbing dunes in Shannan valley section of Yarlung Tsangpo River, China[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(2): 153−163.]

[43] 周娜, 张春来, 刘永刚. 雅鲁藏布江米林宽谷段爬升沙丘粒度分异特征研究[J]. 地理研究, 2012, 31(1): 82−94. [Zhou Na, Zhang Chunlai, Liu Yonggang. Variation of grain sizes on a mountain climbing dune in Mainling Wide Valley, Yarlung Zangbo River[J]. Geographical Research, 2012, 31(1): 82−94.]

[44] Pan M H, Wu Y Q, Zheng Y, et al. Holocene aeolian activity in the Dinggye area (Southern Tibet, China)[J]. Aeolian Research, 2014, 12: 19−27.

[45] 毛东雷, 吴云霞, 蔡富艳, 等. 新疆策勒绿洲−沙漠过渡带灌丛沙堆与回涡沙丘的粒度分布特性[J]. 泥沙研究, 2019, 44(2): 48−54. [Mao Donglei, Wu Yunxia, Cai Fuyan, et al. Spatial distribution of sand grain size on aeolian deposition of nebkhas and backvortex dunes in oasis-desert ecotone in Cele, Xinjiang[J]. Sediment Research, 2019, 44(2): 48−54.]

Grain size characteristics and environmental significance of different types of dune surface sediments in the Dinggye area, southern Xizang

GONG Yifu, PAN Meihui, LI Na, HAO Zewen, CHEN Yougui, LI Chenlu
(Collage of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: To explore the environmental significance of grain size characteristics, modern dunes in the Dinggye area of Xizang, China were sampled to analyze the grain size characteristics of surface sediments from different types of dunes. The results are as follows: (1) The grain size composition was similar between mobile and climbing dunes, and the grain size composition differed significantly between nebkha and the two dune types. The surface sediments of mobile and climbing dunes were dominated by fine and medium sands, whereas those of nebkha were dominated by very fine sand, fine sand, and powdery sands. (2) The grain size parameters of these dunes showed different trends, with the surface sediments of mobile and climbing dunes well sorted, nearly symmetrical, and moderately sharp, and those of nebkha moderately sorted, positively skewed, and very sharp. (3) The frequency distribution curves of mobile and climbing dunes are nearly symmetrical and single-peaked, whereas those of nebkha are bimodal; the differences in the probability accumulation curves of the surface sediments of these dunes are more obvious. (4) The deposition environment of the surface sediments of these dunes is mainly dominated by wind-formed deposition, with a few river deposits. (5) A comparison of particle size characteristics of the surface sediments of these dunes shows that the differences in particle size characteristics are mainly because of the joint action of sand source, vegetation cover, and wind conditions.

Key words: dunes; surface sediments; grain-size characteristics; environmental significance; Dinggye area